



## Afyon Ovası soğuk su akifer sisteminde kirlenme modeli

### Pollution model of the Afyon Plain cold water aquifer system

#### A. Özlem ATILLA

Hacettepe Üniversitesi, Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM),  
06532 Beytepe, ANKARA

#### ÖZ

Afyon Ovası'nda Neojen yaşlı birimlerden oluşan soğuk su akiferi, daha az geçirimli Paleozoyik yaşlı termal akifer üzerinde yer almaktadır. İki akifer arasındaki geçirimsizlik farkına bağlı olarak; önemli bir doğal yeraltısuyu akımının olmadığı, buna karşın kuyularla yapılan çekime bağlı olarak soğuk su akiferinde termal akiferin kimyasal bileşiminden kaynaklanan bir kirlenme olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım üzerine kavramsal model oluşturulduktan sonra yeraltısuyu akımı ve çözünmüş madde taşınımı, MF2K-GWT modeli ile benzeştirilmiştir. Bu kapsamda; akım ve taşınım ile ilgili tüm parametreler, sınır ve başlangıç koşulları belirlenmiş, model parametreleri akım modelinde evrik, taşınım modelinde ise deneme-yanılma yöntemiyle kalibre edilmiştir. Model sonuçlarının parametrelere olan bağımlılığının belirlenmesi amacıyla parametre hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Taşınım modeli sonuçlarının doğrulanması amacı ile gözlem kuyularında gözlenmiş Cl iyonu konsantrasyonları ile model kalibre edilmiş, Br iyonu konsantrasyonları kullanılarak sonuçların sağlanması yapılmıştır. Sonuç olarak; belirlenen kavramsal yapı çerçevesinde termal akiferden soğuk su akiferine doğru olan kirlenmenin zaman ve konum içerisindeki gelişimi ortaya konmuştur. Buna göre, yeraltısuyu kullanımının yoğun olduğu yerlerde, soğuk su kuyularında derin termal suların girişiminin zaman içerisinde yayılımı hesaplanmış ve yeraltısuyu işletiminin aynı şekilde devam etmesi durumunda kirlenmenin gelecekte tüm akiferi etkileyebileceği belirlenmiştir. Cl konsantrasyonları, ovanın kuzey ve KB'sında yer alan Fethibey, Demirçevre, Sadıkbey ve Küçükçobanlı çevresinde 50 m'den itibaren artmakta ve 200 m'ye kadar 250 mg/l'ye kadar ulaşmaktadır. Ovanın doğu ve güney kesimlerinde yer alan Beyyazı, Susuz ve Akçin yörelerinde ise akiferin üst kesimlerinde belirgin bir kirlenme görülmezken, 250-400 m derinliklerde Cl konsantrasyonu 600 mg/l'ye ulaşmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Afyon Ovası, MF2K-GWT, MOC3D, MODFLOW, taşınım, yeraltısuyu kirliliği.

#### ABSTRACT

The cold water aquifer composed of the Neogene age units overlies less permeable Paleozoic age thermal aquifer in the Afyon Plain. It is assumed that no significant groundwater flow occurs between two aquifers due to large difference in their hydraulic conductivities, and opposing to this, the cold water aquifer is polluted by the chemicals of the thermal system due to groundwater extraction through the wells. The conceptual model is based on this assumption, and the groundwater flow and solute transport is simulated by the finite difference numerical analysis and particle tracking methods, with the MF2K-GWT code. In this scope, flow and transport parameters, initial and boundary conditions are determined, and the model parameters are calibrated inversely in the flow model, and by trial-and-error method in the transport model. The sensitivity analysis is performed to determine the dependence of the results to the model parameters. The measured Cl ion concentration in observation wells is used for calibration, and model verification is proved with Br ion concentrations. As a result, the temporal and spatial extent of the pollution from the thermal aquifer to the cold water aquifer is estimated in frame of the conceptualization of the system. The temporal spreading of the intrusion of deep thermal water is estimated in the areas of the dense groundwater exploitation, and it is determined that the pollution will influence all the aquifer, in case of the continuation of current groundwater exploitation system. The Cl concentration reaches to 250 mg/l from the depth of 50 m to 200 m in the surrounding of Fethibey, Demirçevre, Sadıkbey, and Küçükçobanlı located at north and NW parts of the plain. While the pollution is not significant in the upper parts of the aquifer around Beyyazı, Susuz, and Akçin at the east and south of the plain, the Cl concentration reaches to 600 mg/l at the depths of 250 to 400 m.

**Key words:** Afyon Plain, MF2K-GWT, MOC3D, MODFLOW, transport, groundwater pollution.

## GİRİŞ

Yeraltısuyu kirliliği konusu, günümüzde önemli bir problem haline gelmiştir. Yeraltısularının kullanıma uygun kalitede olması büyük önem taşımaktadır. Yeraltısuyu kalitesinin bozulması; deniz-suyu girişimi, termal kirlilik, radyoaktif atıklar, yüzey-yeraltısuyu etkileşimleri, bazı atık maddelerin yüzeyaltında depolanması vb. nedenlerle değişik şekillerde olabilmektedir. Bu şekilde sisteme giren kirlenici, sistemde zamana bağlı olarak yayılmakta ve kalite bozulmalarına sebep olmaktadır.

Günümüzde kirlenicilerin yeraltısuyu sistemi içerisinde yayılımını ve dinamiğini ortaya koyan MOC3D (Konikow vd, 1996), MOC DENSE (Sanford ve Konikow, 1985), SUTRA (Voss, 1984) vb. birçok matematiksel model bulunmaktadır. Bu modeller, herhangi bir zamanda ve konumda yeraltısuyunda bulunan çözünmüş kimyasal elemanların konsantrasyonlarını hesaplamaktadır. Bu çalışmanın amacı, yoğun yeraltısuyu kullanımının gerçekleştiği Afyon Ovası'nda soğuk yeraltısuyu sisteminin altında bulunan sıcak su akifer sisteminden kaynaklanan termal kirlenmenin, soğuk yeraltısuyu sistemi içerisindeki yayılımı ve zamana bağlı değişiminin USGS (United States Geological Survey) tarafından geliştirilmiş ve MOC3D programının MODFLOW-2000 (Harbaugh et al., 2000) model programı ile birleştirilmiş sürümü olan MF2K-GWT (MODFLOW 2000 – Groundwater Transport Processes) matematiksel modeli aracılığıyla ortaya konmasıdır.

Bu kapsamda, Afyon Ovası yeraltısuyu akım alanı 3 boyutlu sonlu farklar gridlerine ayrılmıştır. Akım ve taşınım ile ilgili tüm parametrelerin yanı sıra, sınır ve başlangıç koşulları bu ağ üzerine yayılmıştır. Model parametreleri akım modelinde evrik, taşınım modelinde ise deneme-yanılma yöntemiyle kalibre edilmiştir. Akım modeli kalibre edildikten sonra hassasiyet ve sağlama analizleri yapılmıştır. Termal kirlenme modelinde, herhangi bir reaksiyona girmediği ve tutulma süreçlerinden etkilenmediği varsayılan Cl iyonu konsantrasyon değerleri kullanılmıştır. Model sonuçları, zamana bağlı olarak konsantrasyon değerlerinde bir artış ve bu artışın kuyularla çekimin yoğun olduğu yıllarda daha belirgin olduğunu göstermiştir. Ayrıca, model tarafından hesaplanan ve ova yüzeyinden itibaren 200 m derinlikte gözlenen yoğun konsantrasyon

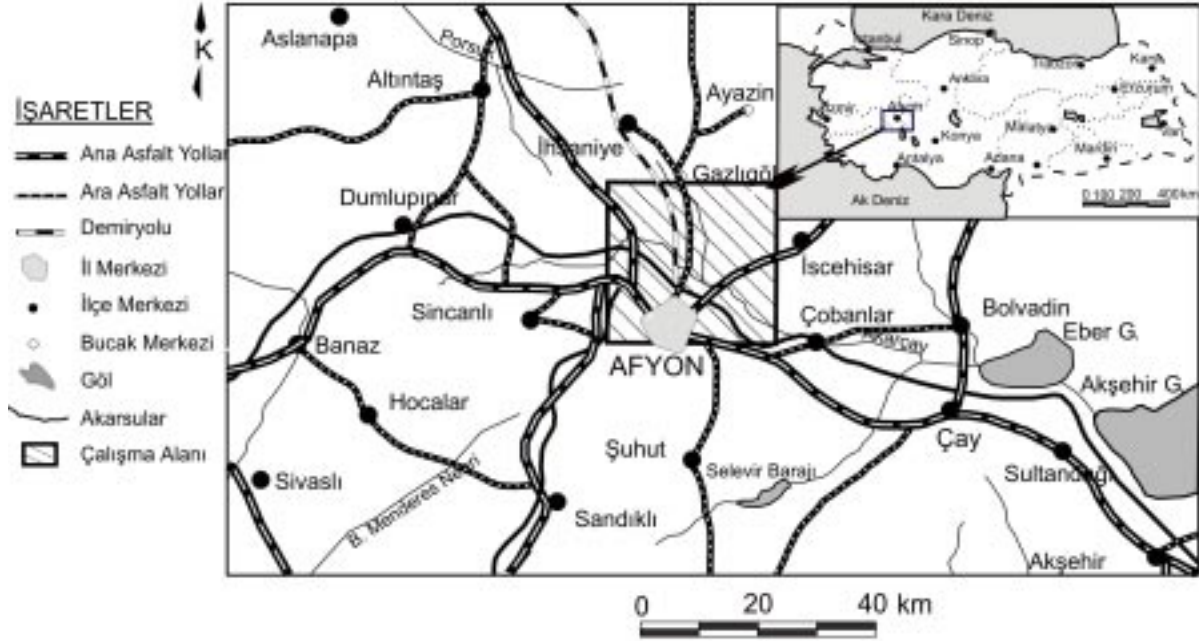
değerlerinin gelecekte tüm soğuk su akifer sistemini etkileyebileceği görülmüştür.

## ÇALIŞMA ALANININ YERİ VE HİDROJEOLOJİK YAPISI

Afyon Ovası, 38° - 39° kuzey enlemleri ile 30° - 31° doğu boylamları arasında yer almaktadır. Afyon ilinin kuzey kesiminde yaklaşık 230 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kaplayan ova, 818.5 km<sup>2</sup>'lik bir yüzey drenaj alanına sahiptir. Ovanın uzun eksenini yaklaşık olarak 16 km, kısa eksenini ise 14 km'dir. İnceleme alanına ait yer bulduru haritası Şekil 1'de verilmiştir.

Ovadaki yükselti değeri sınırlarda artmasına rağmen, hemen hemen tüm ova boyunca 1010-1020 m kotlarında bulunmaktadır. Ovası çevreleyen yükseltiler, inceleme alanının kuzey ve doğusunda 1400 m, GB'sında 1700 m kotlarına ulaşmaktadır. Bölgede karasal iklim hüküm sürmekte olup, yıllık ortalama yağış miktarı 417.7 mm, buharlaşma miktarı ise 1170 mm'dir. Ovası kateden en önemli akarsu Akarçay'dır.

Afyon Ovası ve yakın civarının jeolojik yapısı Metin vd. (1987, 1988), Erkan vd. (1996), Aydar vd. (1996) tarafından; hidrojeolojik yapısı ise Tezcan vd. (2002) tarafından ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Alanda en yaşlı birimi Paleozoyik yaşlı İncehisar Mermerleri (Pz-Mrm) ve Metakonglomera Üyesi'nden (Pz-Mkg) oluşan Afyon Metamorfileri (Pz-Sst) oluşturmaktadır (Şekil 2). Ovada bu kayalar sıcak sular için akifer özelliği göstermektedir. İnceleme alanında geniş alanlar kaplayan Senozoyik yaşlı birimler Miyosen (Mi-Dtr), Pliyosen (Pl-Dtr) ve Kuvaterner (Q-Alu) ile temsil edilmektedir. Pliyosen yaşlı birimler Marn Üyesi (Pl-Mrn), Kireçtaşı Üyesi (Pl-Kct), Seydiler Tüf ve Aglomeraları (Pl-Tuf), Trakit (Pl-Tra) ve Bazalt (Pl-Baz)'tan oluşmaktadır. Senozoyik yaşlı birimler, Paleozoyik yaşlı kayalar üzerinde uyumsuz olarak görülmektedir. Ovada soğuk su akiferini Neojen yaşlı kayaların kumlu ve çakıllı seviyeleri oluşturmaktadır. Bu seviyeler, yüksek iletkenlik ve depolama özelliğine sahiptirler. Bu kayalar, geçirimsizliği çok düşük ( $K < 0.01$  m/gün) ve genel olarak yüzeyden itibaren 10-20 m derinliğe ulaşan Kuvaterner yaşlı alüvyon ile örtülmüştür. Bu örtüde yer alan Kuvaterner killeri ile Neojen'in marnlı seviyeleri ova alanında akiferlerin basınçlı bir özellik kazanmasına neden olmaktadır. Neojen



Sekil 1. Afyon Ovası yer bulduru haritası.  
Figure 1. Location map of Afyon Plain.

yaşlı volkanik kayalar da çatlak ve eklem sistemleri boyunca yeraltısu taşıyabilmektedirler.

### YERALTISUYU KİRLENME POTANSİYELİ

Afyon Ovası'nda, daha çok sulama amaçlı olmak üzere, 1966-1998 yılları arasında soğuk su akiferi içinde Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından açılmış olan 105 adet sondaj kuyusu yer almaktadır. Kuyu debileri 6-75 l/s arasında değişmektedir. Bu kuyuların hepsi Neojen çökelleri içinde açılmıştır. Çekim miktarının açılan kuyu sayısına bağlı olarak 1976 yılından sonra arttığı ve özellikle 1990 yılından sonra da ovada önemli ölçüde yeraltısu kullanımının gerçekleştiği belirlenmiştir (Tezcan vd., 2002). Bu tarihten itibaren, derin kuyularda kalite bozulmaları rapor edilmeye başlanmış ve açılan kuyuların derinliği azaltılmıştır. Kirlenme, başlangıçta yerel olarak sıcak su kuyularının açıldığı Ömer-Gecek sahasına yakın alanlarda ortaya çıkmış, günümüzde de ovanın tüm bölgelerinde görülmeye başlamıştır. Özellikle 100 m'den daha derin işletme kuyularının bulunduğu alanlarda sulama suyu kalitesinin bozulduğu görülmektedir. Günümüzde ovanın KB'sında, kuzeyinde, GD'sunda ve orta kesimlerinde açılan kuyularda 80 m'den daha derine inilmemektedir.

Doğdu (2001), Akarçay Havzası'nda jeotermal kökenli yüzey suyu ve yeraltısu kirliliğinin araştırılması ile ilgili olarak yaptığı çalışmada, soğuk yeraltısu sisteminde gözlenen termal kirlenme miktarının yeraltısu kullanımının yoğun olduğu bölgelerde daha çok olduğunu ve termal etki alanı altında bulunan soğuk suların, TSE (1997) tarafından belirtilen sınır değerleri dikkate alınarak, genel olarak içme ve kullanmaya uygun olmadığını belirtmiştir.

İnceleme alanında yer alan bazı sıcak ve soğuk su kuyularından Eylül 1998 ve Temmuz 1999 döneminde kimyasal analizler için örnekler alınmış ve Hacettepe Üniversitesi Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM) Su Kimyası Laboratuvarlarında kimyasal analizleri yapılmıştır. Kimyasal analizleri yapılan bu soğuk su kuyularında, sıcak sularda yüksek miktarlarda görülen Na, Cl, Li, B, Br, As vb. iyon ve metallere, standartların üzerinde rastlanması sıcak su girişiminin bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir (Çizelge 1).

### KAVRAMSAL HİDROJEOLJİK MODEL

Afyon Ovası'nda özellikle sulama mevsimi boyunca soğuk su akiferinden önemli ölçüde su

Çizelge 1. Afyon Ovası ve çevresinde yer alan bazı sıcak ve soğuk su kuyularında Temmuz 1999 ve Eylül 1998 tarihinde ölçülen fiziksel ve kimyasal parametreler (Tezcan vd., 2002).

Table 1. Results of the physical and chemical analysis of groundwaters in Afyon Plain and vicinity carried out between July 1999-September 1998 in the study area (after Tezcan et. al., 2002).

Temmuz 1999																
Kuyu No.	Yeri	T (°C)	pH	EC*	DO	Na	K	Ca	Mg	HCO <sub>3</sub> +CO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Br	B	Li	As**
13324	Beyyazı	15.9	6.4	1683	4.2	173.0	18.5	121.0	19.0	627.1	145.3	31.0	1.2	1.1	0.38	10.6
30513	Fethibey	14.1	7.3	974	5.9	148.2	13.0	54.0	10.0	533.0	51.4	17.2	0.6	0.6	0.27	12.2
31882	Sadıkbey	24.0	6.4	1704	5.2	115.0	12.5	73.0	20.0	279.4	184.3	26.6	1.5	-	0.15	72.9
33039	Çayırbağ	15.2	6.9	597	6.2	46.4	5.5	56.0	11.0	285.1	33.7	16.7	0.4	-	0.09	6.6
34230	DSİ Tesisleri	22.3	7.1	1327	5.3	186.9	12.0	107.0	45.5	432.1	248.2	100.6	2.8	-	0.24	62.3
34428	Saraydüzü	14.8	6.9	1039	5.7	96.9	12.5	90.0	11.5	376.3	125.9	20.3	0.9	-	0.18	46.6
40939	Kumartaş	15.1	7.3	537	7.0	27.0	3.0	64.0	11.0	267.9	23.0	13.0	0.2	-	0.02	8.0
42670	Bayatçık	11.8	7.3	1178	5.7	112.5	13.5	94.5	18.0	439.0	109.9	33.5	1.0	-	0.23	41.8
45810	Demirçevre	19.2	6.5	604	5.7	52.3	7.5	44.5	12.5	210.9	62.0	20.3	0.5	-	0.08	57.8
49179	Susuz	16.5	7.3	577	9.0	23.9	4.5	55.0	23.0	253.4	23.0	24.5	0.3	-	0.04	14.6
51980	Beyyazı	14.9	7.7	518	7.0	15.8	1.5	63.5	12.0	228.0	17.7	13.4	0.2	-	0.02	6.1
AF-7	Ömer sck	48.0	7.6	7186	1.9	1500.0	121.0	102.0	16.0	802.0	1878.9	281.4	9.3	8.8	2.45	176.3
AF-9	Oruçoğlu sck	51.0	6.1	4299	1.6	722.0	57.0	192.5	32.0	1014.7	921.7	157.9	5.6	2.7	1.22	176.3
Eylül 1998																
Kuyu No.	Yeri	T (°C)	pH	EC*	DO	Na	K	Ca	Mg	HCO <sub>3</sub> +CO <sub>3</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	Br	B	Li	As**
13324	Beyyazı	15.0	7.1	930	6.2	74.8	11.7	82.0	35.8	309	91.1	54.5	0.2	-	0.12	19.1
30513	Fethibey	15.3	7.4	958	5.2	166.8	12.5	45.4	20.5	456	54.2	14.1	0.1	-	-	31.1
45810	Demirçevre	18.5	7.0	620	5.1	55.2	9.8	46.0	29.3	193	68.1	28.3	0.1	-	0.06	39.2
51980	Beyyazı	14.3	7.7	465	7.8	21.9	1.2	53.0	24.4	208	20.9	14.5	-	-	0.01	31.7

\*( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ); \*\*( $\text{ng}/\text{l}$ ); (-) değer yok; değerler  $\text{mg}/\text{l}$  cinsindedir

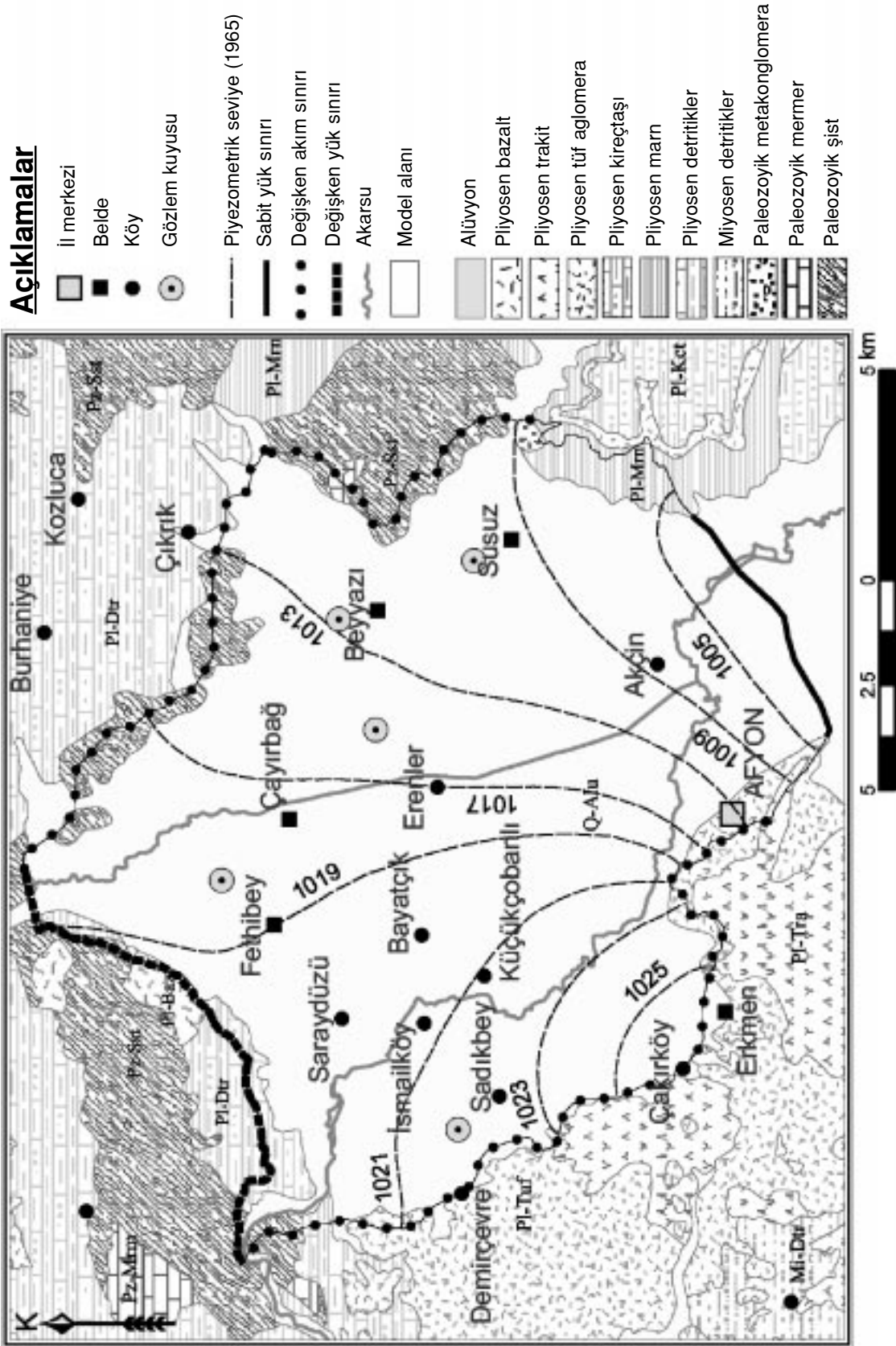
çekilmesi sonucu, iki akifer arasında artan hidrolik gradyan nedeniyle sıcak su akiferinden soğuk su akiferine doğru bir yeraltısuyu hareketi gerçekleşmektedir. Sıcak su akiferinin hidrolik iletkenlik katsayısının çok düşük ( $10^{-8}$  m/gün) olması nedeniyle, karışım hacmi önemli bir büyüklüğe ulaşmasa da, termal akiferin kimyasal bileşimindeki kirleticilerin advectif-dispersif bir hareket ile soğuk su akiferine karışması mümkün olmaktadır.

Afyon Ovası kavramsal modelinin oluşturulması amacıyla öncelikle toplanan jeolojik, hidrolojik, hidrojeolojik, hidrojeokimyasal veriler yorumlanmış ve analiz edilmiştir. Neojen birimlerinin Afyon Ovası'ndaki kalınlığı bilinmemektedir. DSİ tarafından açılmış kuyuların hiçbirinde Neojen'in tabanına inilememiştir. Ovanın kuzey kesimlerinde Paleozoyik yaşlı şistlerin sınırına yakın konumda açılmış 100 m, ovanın GB'sında açılmış 532 m, doğusunda açılmış 332 m derinlikteki kuyularda da Neojen birimlerinin tabanına ulaşılamamıştır. Bununla birlikte, ovanın KB'sında, Ömer-Gecek sıcak su işletim sahasında ova alanında kalan ve Maden Tetkik ve Arama Ge-

nel Müdürlüğü (MTA) tarafından açılmış olan AF-1 ve AF-13 kuyularında Paleozoyik yaşlı birimlere 500 m derinlikte ulaşılmıştır. MTA tarafından bölgede açılmış sıcak su kuyularının loglarından da Neojen'in alt sınırının doğrudan Paleozoyik yaşlı mermer ve şist birimleri ile sınırlandırıldığı belirlenmiştir (Öktü vd., 1997). Aşağıda bu bilgiler ışığında alan için oluşturulan kavramsal modele ait şematik şekil (Şekil 3) "Grid Tasarımı ve Model Katmanları" bölümünde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

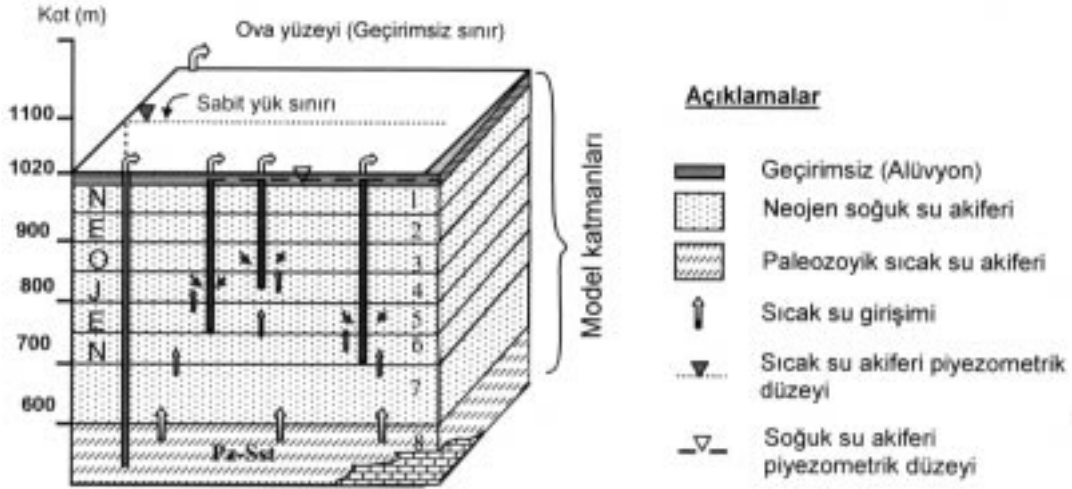
## AKIM MODELİ

Bir bölgeye ait taşınım modeli oluşturulmadan önce, bölgedeki yeraltısuyu akım sisteminin çok iyi tanımlanmış olması gerekmektedir. Bu nedenle, öncelikle ovadaki yeraltısuyu akımı MODFLOW-2000 matematiksel modeli (Harbaugh et al., 2000) ile benzeştirilmiştir. Beslenme – boşalım ilişkileri ve sınır koşullarının etkileri bu model ile ortaya konmuştur (Şekil 2). Bu model için belirlenmiş olan akım parametreleri, başlangıç ve sınır koşulları ile ilgili özet bilgiler Çizelge 2'de sunulmuştur. Model alanının batısında yer



Şekil 2. Başlangıç hidrolik yük dağılımı ve sınır koşulları (Atilla, 2002'den).  
Figure 2. Distribution of the initial hydraulic heads and boundary conditions (after Atilla, 2002).





Şekil 3. Afyon Ovası için model katmanları.  
Figure 3. Model layers for Afyon Plain.

Çizelge 2. Afyon Ovası yeraltısuyu akım modeline ait özellikler.  
Table 2. Properties of the groundwater flow model of Afyon Plain.

Hidrolik parametreler	- Hidrolik iletkenlik katsayısı (K) (soğuk su akiferi) - K (sıcak su akiferi) - Depolama katsayısı	0.1-18 m/gün (Tezcan vd., 2002) $10^{-8}$ m/gün (Daly, 1982) 0.005-0.06 (Tezcan vd., 2002)
Başlangıç koşulları	Model, çekim olmaksızın, dengeli akım koşullarında çalıştırılmış ve akifer hidrolik özellikleri, beslenme koşulları ve sınır koşullarına bağlı olarak 1965 yılı için dengeli yeraltısuyu seviyesi dağılımı elde edilmiştir	
Sınır koşulları	- B, GB sınırından olan beslenme (Pliyosen volkanikler), K, KD sınırından olan beslenme (Pliyosen detritikler, Paleozoyik şistler) - K, KB sınırından iç akışla beslenme (diğer ovalardan) - G, GD sınırından olan boşalım - GD sınırında yer alan Pliyosen marn, killi kireçtaşı - Ova yüzeyi (alüvyon) - Neojen'in tabanında bulunan Paleozoyik şistler	- Değişken akım sınırları* - Değişken yük sınırı** - Sabit yük sınırı (1002 m) - Geçirimsiz sınır - Geçirimsiz sınır - Sabit yük sınırı (1100 m) (Durak ve Küçük (2000))
Kuyu çekimleri	Ovada açılmış tüm kuyuların filtrelediği derinliklere uygun olarak ilgili model katmanlarından yapılmış ve hergün için eşit olarak modele aktarılmıştır	
Model süresi	1965-1998	
Model zaman birimi	Gün	
Grid yapısı	357 kolon, 381 satır (50 m x 50 m)	
Beslenme-Boşalım Dönemi	180 gün (yağışlı ve kurak dönem)	
Kalibrasyon	K katsayıları evrik olarak kalibre edilmiştir	
Hassasiyet Analizi	Sınırlardan olan beslenme değerleri ve K değerleri ile yapılmış, bu parametrelerin değiştirilmesi, hidrolik yük değerinde önemli bir değişim oluşturmamıştır.	

\* Bu sınırlardan olan beslenme değerleri hidrolojik bir model aracılığı ile belirlenmiştir (Tezcan vd., 2002) ve her bir model katmanında eşit değerde olduğu varsayımına dayanılarak modele aktarılmıştır.

\*\* Her su yılı için ayrı değerler girilmiştir.

alan Pliyosen volkanikler ovanın en önemli beslenme bölgesini oluşturmaktadır. Bunun dışında KD'da yüzeylenen Pliyosen detritikler ve Paleozoyik şistlerden de beslenme olmaktadır. Tezcan vd. (2002) tarafından geliştirilen hidrolojik bir model aracılığıyla beslenme miktarı aylık bazda hesaplanmıştır. Bu beslenme değerleri değişken akım sınırı koşulu ile akım modeline aktarılmıştır. Alanın kuzey-KB'sında komşu ovalardan model alanına içe akış gerçekleşirken, güney-GD sınırından ise dışa akış gerçekleşmektedir.

Akım modeli, ovanın KB kısmından GD kısmına doğru hidrolik yük değerlerinin azaldığını göstermektedir. 1970'li yıllardan sonra, özellikle 1990 yılından bu yana, kuyulardan çekimin yoğun olduğu bölgelerde hidrolik yük değerlerinin ova KB'sında 1019-1017 m'lerden 1010-1015 m'ler, ovanın GD'sunda ise 1007-1005 m'lerden 995-1000 m'ler arasına düştüğü belirlenmiştir (Atilla, 2002).

Akım modeli ile elde edilen sonuçların model parametrelerine bağımlılığı hassasiyet analizi ile araştırılmıştır. Akım modeli ile elde edilen hidrolik yük dağılımını kontrol eden akifer parametreleri (hidrolik iletkenlik katsayısı ve depolama katsayısı) ile model sınırlarındaki beslenme değerlerinin etkisini ortaya koymak üzere %1 ölçekli hassasiyet katsayıları ile gözlenen veriler ve model kalibrasyonundan bağımsız bileşik ölçekli hassasiyet katsayıları (Hill, 1998) hesaplanmıştır. Buna göre, gözlem kuyularında model uyumunun sınırlardan olan beslenme miktarından etkilenmediği belirlenmiştir. Akifer parametrelerinden depolama katsayısı ile en üst katmanın hidrolik iletkenlik katsayısının diğerlerine göre daha yüksek hassasiyet katsayılarına sahip olduğu görülmüştür. Ancak bu katsayıların değerleri çok küçüktür. Parametrelerdeki %1'lik değişimin hesaplanan hidrolik yüklerde yarattığı en yüksek fark  $10^{-4}$  m düzeyinde kalmaktadır.

## TAŞINIM MODELİ

Taşınım modellenmesi ile ilgili olarak yapılan ilk çalışmalar 1950'li yıllara kadar uzanmaktadır. İlk olarak Bear ve Verruijt (1987), taşınım denklemlerinin çözümü için sayısal modellerin kullanımına öncülük etmişlerdir. Gelhar vd. (1992), 59 farklı bölgede yaptıkları çalışmada; akifer tipi, hidrolik özellikler, akım şekli ve izleyici türüne

bağlı olarak dispersivite katsayısının aldığı değerler üzerine çalışmışlardır. Konikow (1977) ile Konikow ve Thompson (1984), taşınım modellerinde çok geniş kullanım alanına sahip olan ve adveksiyon-dispersiyon eşitliği temeline bağlı MOC (Method of Characteristics) modelini Rocky Mountain-Arsenal'de korunumlu yeraltısuyu kirleticilerinin hareketinin modellenmesinde büyük başarı ile kullanmışlardır. Goode (1999), karakteristik eğriler yöntemi (MOC) yardımıyla, yeraltısuyu akım modelinin yaş, porozite ve basit kimyasal reaksiyonlar ile kullanımını gösteren bir çalışma yapmıştır. Taşınım modellenmesi ile ilgili yapılan diğer uygulamalı arazi çalışmaları, Cherry (1983), MacFarlane vd. (1983), Sudicky vd. (1983), Molz vd. (1986), Garabedian (1987), Molson (1988), Levy (1993), Kernodle vd. (1995), Buxton ve Smolensky (1999) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, Afyon Ovası'nda sıcak su – soğuk su girişim yüzeyi, herhangi bir reaksiyona girmediği ve tutulma süreçlerinden etkilenmediği varsayılan klorür iyonu konsantrasyon değerleri kullanılarak USGS tarafından geliştirilmiş bir taşınım modeli olan MF2K-GWT ile modellenmiştir. Akım ve taşınım modeline ait verilerin girişi ve sonuçların değerlendirilmesinde ise, Argus Interware Inc. (1997) tarafından geliştirilen Argus-ONE (Argus - Open Numerical Environments) coğrafi bilgi sistemi (CBS) programından yararlanılmıştır.

USGS – MODFLOW-2000 (Harbaugh vd., 2000) yeraltısuyu akım modelinin bir modülü haline gelen MF2K-GWT modeli, MOC3D modelinin MODFLOW-2000 ile birleşmesinden oluşmaktadır. Yeraltısuyu akımı MODFLOW-2000 ile modellenmekte, akım modelinden türetilen akım hızları ile de taşınım denklemi çözülmektedir. MODFLOW-2000 ve MOC3D çözümlenmeleri eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir. Akım modeli ile hesaplanan hız vektörleri kullanılarak aynı zaman adımı taşınım denklemi de çözülmektedir.

MF2K-GWT, yeraltısuyunda çözünmüş madde taşınımını üç boyutlu olarak benzeştiren bir modeldir. MF2K-GWT için MODFLOW'un gerektirdiği verilere ek olarak porozite, dispersivite, başlangıç koşulları ve konsantrasyon değerleri ile gecikme ve bozunma parametrelerinin tanımlanması da gerekmektedir. Dispersiyon ve ge-

çikme parametreleri her model katmanı için sabit değerler almaktadır. Çalışmada sonuçların sağlamlasının yapılması amacı ile bromür iyonu konsantrasyonu kullanılmıştır. Bu iyonun da klorür iyonu gibi herhangi bir reaksiyona girmediği ve tutulma süreçlerinden etkilenmediği varsayılmıştır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında gecikme ve bozunma parametreleri dikkate alınmamıştır.

MOC3D ve buna bağlı olarak MF2K-GWT, taşınım için aşağıdaki kısmi diferansiyel eşitliği kullanılmaktadır (Konikow vd., 1996);

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{V_i}{R_f} \frac{\partial C}{\partial x_i} - \frac{1}{\varepsilon R_f} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \varepsilon D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\sum [W(C' - C)]}{\varepsilon R_f} + \lambda C = 0 \quad (1)$$

Burada, C: hacimsel konsantrasyon (akışkanın birim hacmindeki çözünmüş madde kütlesi) (ML<sup>-3</sup>), ε: etkin porozite (boyutsuz), V: hız bileşeni vektörü (LT<sup>-1</sup>), D: dispersiyon katsayısı (L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>), W: hacimsel su katkısı/kaybı (T<sup>-1</sup>), C': katkı/kayıplardaki hacimsel konsantrasyon (ML<sup>-3</sup>), λ: bozunma hızı (T<sup>-1</sup>), t: zaman (T), x<sub>i</sub>: kartezyen koordinatları (L), R<sub>f</sub>: gecikme faktörüdür.

Bu çalışma kapsamında, taşınım modellenmesi ile ilgili olarak aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır (Atilla, 2002):

- Taşınım, sadece adveksiyon ve dispersiyon süreçleri ile gerçekleşmekte, kullanılan izleyiciler için akifer ortamında herhangi bir reaksiyon, tutulma ya da bozunma gerçekleşmemektedir.
- Yeraltısuyu yoğunluğu, viskozitesi ve sıcaklığında meydana gelen değişimler akım vektöründe bir değişikliğe yol açmamaktadır.
- Sıcak su akiferinde izleyici konsantrasyonu zamanla değişmemektedir.
- Sıcak su akiferinde basınç düzeyi değişmemektedir.
- Soğuk su akiferinde yeraltısuyu işletmeciliğinin başlamadığı dönemde herhangi bir kirlenme bulunmamaktadır.

### Grid Tasarımı ve Model Katmanları

Yaklaşık olarak 230 km<sup>2</sup>'lik bir alan kaplayan model için oluşturulan grid ağı 357 kolon, 381 satır ve toplam 136017 adet bloktan oluşmaktadır. Yeraltısuyu taşınım süreçlerinin modellenmesinde kullanılan tanecik izleme yaklaşımına

ait algoritma üniform grid boyutları gerektirdiğinden (Konikow vd., 1996), her bir hücre 50 m x 50 m'lik bir alanı temsil edecek, grid eksenleri ise Afyon Ovası'nda yeraltısuyu akım yönü ile karşılaştırılacak şekilde seçilmiştir (Atilla, 2002).

Afyon Ovası'nda Neojen soğuk su akiferinin altında bulunan sıcak su akiferinden düşey yönde meydana gelen karışımın hesaplanması amaçlandığından, düşey akım bileşeni de göz önüne alınarak model alanı düşey yönde 8 model katmanına bölünmüştür (Şekil 3). Kuyularla çekimin yoğun olduğu ilk 6 model katmanı kalınlığı 50 m, 7. ve 8. katmanların kalınlıkları 100 m olarak alınmıştır. 8. model katmanı sıcak su akiferi ile temsil edilmektedir. Afyon Ovası üstten geçirimsiz bir örtü ile kaplı olduğundan, tüm model katmanları basınçlı akifer olarak değerlendirilmiştir.

### Başlangıç Koşulları ve Model Süresi

Kirlenmenin yeraltısuyu kullanımına bağlı olarak ortaya çıktığı ve yeraltısuyu işletmeciliği öncesinde (1966 yılı öncesi) soğuk su akiferinde bir kirlenme olmadığı varsayılarak, soğuk su akiferinde başlangıç izleyici konsantrasyonları doğal koşullardaki değer olarak verilmiştir. Modelde, izleyici olarak hem korunumlu bir iyon olarak kabul edilen ve hem de ovada sıcak su akiferinden başka herhangi başka bir kaynağa sahip olmadığı varsayılan klorür iyonu konsantrasyonu değerleri kullanılmıştır. Cl konsantrasyonları, başlangıç değeri olarak, tüm soğuk su model katmanlarında arazi çalışmalarında kirlenmenin olmadığı bölgelerde ölçülmüş değer olan 10 mg/l olarak verilmiştir. Sıcak su akiferinde açılmış ve Neojen soğuk su akiferinden etkilenmeyen kuyularda, ölçülen ve literatürde Şimşek (2000) tarafından belirtilen Cl değerleri, yaklaşık olarak 1800-2000 mg/l arasında değişmektedir. Bu nedenle, sıcak su akiferini temsil eden 8. model katmanı için başlangıç Cl değeri, ölçülmüş en yüksek değeri (Şimşek, 2000) temsilen 2000 mg/l olarak alınmıştır. Model süresi, yeraltısuyu akım modelinde olduğu gibi 1965-1998 yıllarını kapsamaktadır.

### Sınır Koşulları

Taşınım modelinde sıcak su akiferinde konsantrasyon değerinin zamana bağlı olarak değişme-



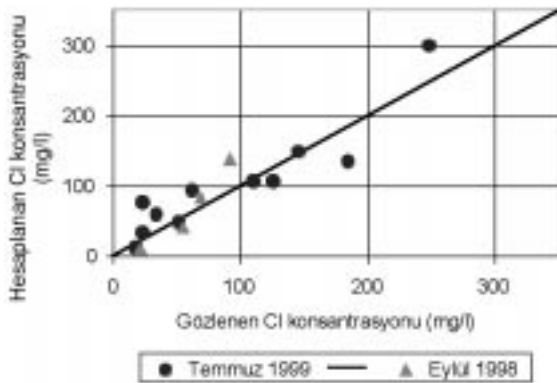


Cl konsantrasyonu değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu şekilde hesaplanan Cl konsantrasyonları ile Temmuz 1999 ile Eylül 1998 yıllarında gözlenmiş Cl konsantrasyonları değerleri arasındaki karşılaştırma Şekil 5'de sunulmuştur. Bu grafikten de görüldüğü gibi, hesaplanan Cl konsantrasyonları ile gözlenen değerler arasında iyi bir uyum sağlanmıştır.

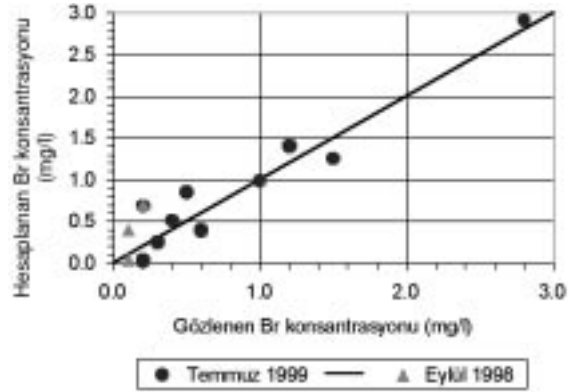
Cl değerleri ile yapılan bu kalibrasyon sonucu elde edilen dispersivite dağılımı hiç değiştirilmeden, sağlama amacıyla model, Br izleyicisi kullanılarak tekrar çalıştırılmıştır. Ovada ölçülmüş en yüksek Br değeri Afyon kentinin ısıtılmasında kullanılan sıcak suyun boşalım noktasında 18.2 mg/l'dir. Bu nedenle, Br için 8. model katmanında konsantrasyon sınır değeri 20 mg/l olarak verilmiştir. Bu şekilde, gözlenen ve hesaplanan Br konsantrasyonlarının da uyumlu oldukları ve kalibre edilmiş model parametrelerinin sağlamlasının gerçekleştiği görülmüştür (Şekil 6).

Kalibrasyon sonucunda, hesaplanan ve gözlenen Cl konsantrasyonları arasındaki ortalama fark 22 mg/l, en yüksek fark ise 48 mg/l olarak elde edilmiştir. Br için bu değerler ise 0.4 ve 0.7 mg/l olarak belirlenmiştir. Farkların %60'ı ortalama değerlerden daha küçüktür. Taşınım modelinde dispersivite katsayısı, tüm model katmanı boyunca sabit bir değer ile tanımlanmakta ve bu katsayının konumsal değişimi dikkate alınmamaktadır. Dispersivite katsayısının kalibrasyon sırasında değiştirilmesi tüm gözlem noktalarının



Şekil 5. Cl konsantrasyonu değerlerine bağlı olarak elde edilen kalibrasyon grafiği.

Figure 5. Calibration graph based on the values of Cl concentrations.



Şekil 6. Hesaplanan ve gözlenen Br konsantrasyonlarının karşılaştırılması.

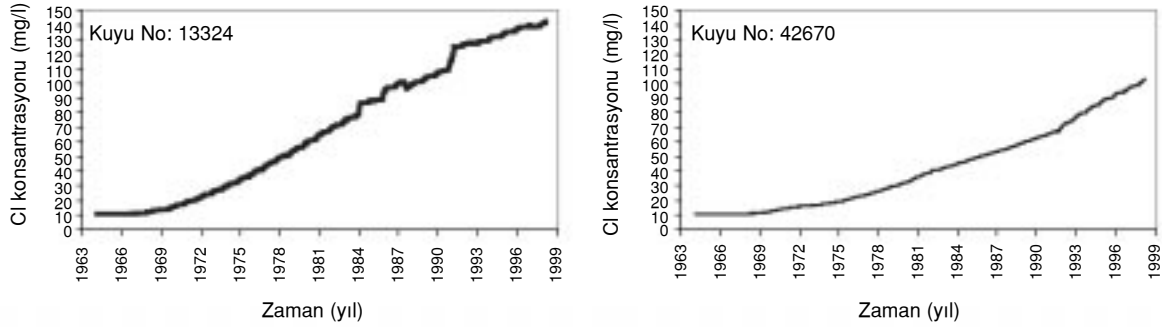
Figure 6. The match of the observed and calculated Br concentrations.

da aynı etkiyi yaratmaktadır. Bu nedenle bazı kuyularda hesaplanan ve gözlenen değerler arasında çok iyi bir uyum yakalanırken bazı kuyularda ise sapmalar ortaya çıkmıştır. Akifer malzemesinin heterojen bir yapıya sahip olması ve kirlenme hareketinin yeraltı suyu akım hızına bağımlı olması nedeniyle, hızı etkileyen hidrolik iletkenlik katsayısı değerlerinin heterojeniteye bağlı olarak kalibrasyonu bu sorunu giderecektir.

### Benzeşim Sonuçları

Ovanın orta kesimlerinde yer alan 13324 ve 42670 numaralı kuyularda hesaplanan Cl konsantrasyonu dağılımının zamana bağlı değişimi Şekil 7'de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde zamana bağlı olarak konsantrasyon değerlerinde bir artış olduğu, kuyularla çekimin yoğun olduğu yıllarda konsantrasyondaki artışın daha belirgin olduğu görülmektedir. Grafiklerde 1990'lı yıllardan sonra meydana gelen salınım, bu yıldan sonra beslenme miktarındaki azalma ve kuyularla çekimin artmasına bağlı olarak Cl konsantrasyonundaki artıştan kaynaklanmaktadır.

Konsantrasyon değerlerinde, zamanla artan kuyu çekimlerine bağlı olarak meydana gelen değişimin ova geneli için her bir model katmanındaki dağılımının görülebilmesi amacıyla 1998 yılı sonu için model tarafından hesaplanan konsantrasyon dağılımları Şekil 8'de sunulmuştur. Şekildeki grafikler incelendiğinde, konsantrasyon dağılımının başladığı kaynağa yakın olan 7.



Şekil 7. 13324 ve 42670 nolu kuyularda hesaplanan Cl konsantrasyonu dağılımları.  
Figure 7. Distribution of the calculated Cl concentrations of the wells 13324 and 42670.

model katmanında değerlerin yüksek olduğu ve 1. model katmanına doğru çekimin etkisi ile giderek yayıldığı görülmektedir. 1. ve 2. model katmanlarındaki değerler incelendiğinde (ova yüzeyinden ilk 100 m'deki derinlik), özellikle kuyu sayısının fazla ve çekimin yoğun olduğu Susuz batısı ile Erenler, Bayatçık ve Sadıkbey yörelerinde konsantrasyon değerleri daha yoğun olarak gözlenmektedir. Genel bir değerlendirme yapılması için her bir model katmanı için şekilde yer alan konsantrasyon dağılımları incelendiğinde, ova yüzeyinden itibaren 200 m derinlikte gözlenmeye başlayan yoğun konsantrasyon değerlerinin düşey ve yatay yöndeki hareketinden dolayı gelecekte tüm soğuk su akifer sistemine yayılması kaçınılmaz görünmektedir.

## TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, yeraltısuyu kullanımının artan yoğunlukta gerçekleştiği Afyon Ovası'nda soğuk yeraltısuyu sisteminin altında yer alan termal akifer sisteminden kaynaklanan kirlenmenin soğuk yeraltısuyu sistemi içerisindeki yayılımının ve zamana bağlı gelişiminin matematiksel modeli oluşturulmuştur. Kavramsal model; soğuk su akiferinin yoğun olarak kullanılmasına bağlı olarak hidrolik dengenin bu akifer aleyhine bozulması sonucu soğuk su akiferine termal bir girişimin meydana geldiği varsayımı üzerine kurulmuştur.

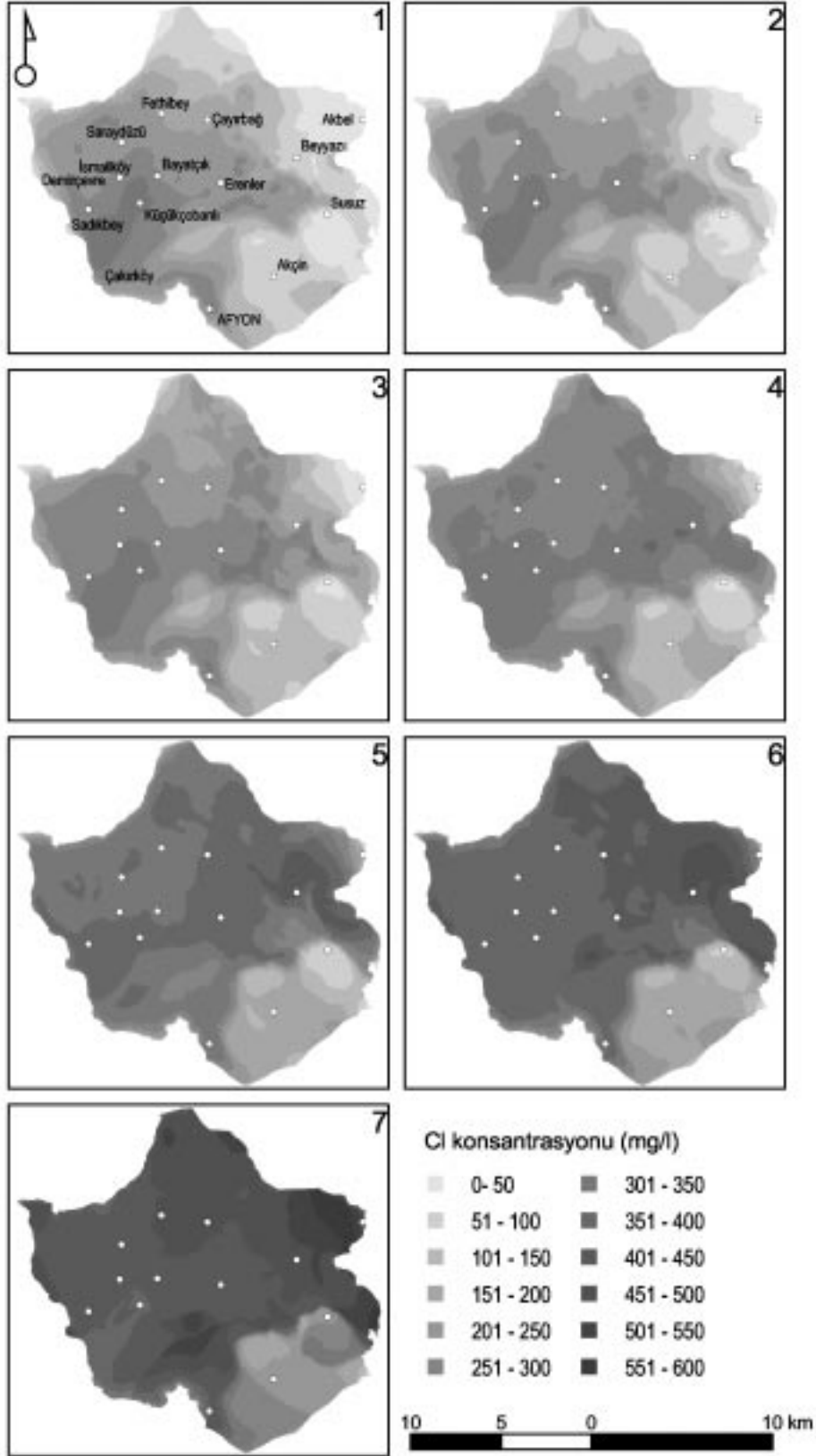
Afyon Ovası'nda sıcak su – soğuk su girişim yüzeyi, klorür iyonu konsantrasyon değerleri kullanılarak USGS tarafından geliştirilmiş bir taşınım modeli olan MF2K-GWT ile modellenmiştir. Taşınım modeli için Neojen akiferinin tabanında bulunan ve 8. model katmanı ile temsil edilen Paleozoyik yaşlı şistlerden gelen Cl konsantras-

yonu değerleri “sabit konsantrasyon sınırı” olarak modele aktarılmıştır.

Afyon Ovası soğuk su akiferindeki kirlenme modeli için hem korunumlu bir iyon olarak kabul edilen ve hem de ovada sıcak su akiferi dışında herhangi başka bir kaynağa sahip olmadığı varsayılan Cl iyonu izleyici olarak kullanıldığından, modelde gecikme ve bozunma parametreleri gözönüne alınmamıştır. Cl konsantrasyonları, başlangıç değeri olarak soğuk su akiferi için 10 mg/l, sıcak su akiferi için ise 2000 mg/l olarak verilmiştir. Afyon Ovası taşınım modeli kalibrasyonu dispersivite değerleri kullanılarak yapılmış ve gözlenen ve hesaplanan Cl konsantrasyonu değerlerinin uyumu sağlanana kadar dispersivite değerleri değiştirilerek model kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sonucunun soğuk su akiferinde ölçülmüş ve korunumlu bir iyon olan Br konsantrasyon değerleri kullanılarak sağlanması gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmalar ışığında, Afyon Ovası'nda, soğuk su akiferinde gözlenen kalite bozulmalarının kökeninin sıcak su akiferi olduğu ve kirlenmenin soğuk su seviyesindeki düşümlere bağlı olduğu ortaya konulmuştur. Taşınım modeli sonucuna göre, kuyularda çekimin arttığı 1975 yılından başlayarak, özellikle 1985-1990 yıllarından sonra hidrolik yük değerlerindeki azalma sonucu kirlenici konsantrasyonları yükselmiştir. Kirlenme, sıcak su akiferi ile olan sınırdan yüzeye doğru yayılmaktadır. Bununla birlikte, soğuk su çekiminin ova alanında her yerde aynı olmaması nedeniyle düşümün fazla olduğu bölgelerde kirlenme yüzeye daha fazla yaklaşmaktadır.

Afyon Ovası'nın kuzey ve KB kesimlerinde Cl konsantrasyonlarının üstteki geçirimsiz tabaka-



Şekil 8. Afyon Ovası'nda soğuk su katmanlarında hesaplanmış Cl konsantrasyonları (mg/l).  
Figure 8. Calculated Cl concentrations of the cold water model layers in Afyon Plain (mg/l).

dan itibaren 50 m derinliğe kadar 50-150 mg/l arasında değerlere ulaştığı belirlenmiştir. 200 m derinliğe kadar bu değerler 250 mg/l'ye kadar ulaşmaktadır. Bu derinliklerde kirlenme Fethibey, Demirçevre, Sadıkbey ve Küçükçobanlı çevresinde yoğun olarak görülmektedir. Bu nedenle bu alanlarda yeni kuyuların 50-70 m'den daha derin açılmaması, mevcut kuyularda ise çekim değerlerinin azaltılması gerekmektedir. Ovanın doğu ve güney kesimlerinde yer alan Beyyazı, Susuz ve Akçin yörelerinde ise yüzeyde belirgin bir kirlenme görülmezken, 250-400 m derinliklerde Cl konsantrasyonu 600 mg/l'ye ulaşmaktadır.

Hesaplamalarda belirsizliğin en fazla olduğu nokta, sıcak su akiferi ile soğuk su akiferi arasındaki hidrolik ilişkidir. Bu ilişkiyi ortaya koyacak yeterli veri bulunmamaktadır. Neojen akiferinde açılmış en derin kuyular sıcak su akiferine ulaşmamaktadır. Öte yandan, ova alanında açılmış en derin sıcak su kuyusu ise, Neojen sistemini tamamen kapalı geçmiştir. Ovada sıcak su sisteminden kaynaklanan kirlenme, soğuk su akiferinde bir heterojenite göstermektedir. Kirlenme sorunu ovanın değişik alanlarında, değişik derinliklerde açılmış kuyularda ortaya çıkmıştır. Bu doğrultuda sıcak su sisteminin soğuk su sistemine karışımı Neojen'in Paleozoik'le temas ettiği tüm yüzeylerden olabileceği yaklaşımını doğurmuştur.

Taşınım modelinde kullanılan Cl iyonu konsantrasyonlarındaki artışın sıcak su akiferinden kaynaklandığı, başka herhangi bir kaynaktan Cl iyonu gelmediği varsayılmıştır. Mevcut durumda alanda herhangi başka bir Cl kaynağı görülmesede, olabilecek başka Cl katkısı göz ardı edilmemelidir. Ayrıca, taşınım modelinde kullanılan dispersiyon katsayısı değerleri doğrudan ölçülmemiş olup, kalibrasyon ile elde edilmiş değerlerdir. Alanda bu değerlerin deneysel olarak belirlenmesi gelecekte modelin tekrar çalıştırılıp geçerliliğinin kontrol edilmesi açısından yararlı olacaktır. Benzer şekilde, hidrolik iletkenlik katsayısının kalibrasyonunda heterojenitenin de dikkate alınması modelin temsil ediciliğini arttıracaktır.

Bu model çalışmasının sonuçları, gelecekte soğuk su akiferinden daha fazla yeraltısuyu çekilmesi halinde, termal yeraltısuyu katkısının daha çok olacağını göstermektedir. Ancak bu katkı,

sıcak su kullanımının ve beslenme koşullarının bugünkü düzeyinde olması halinde mümkün olabilir. Termal yeraltısuyu kullanımının, soğuk su akiferindeki yeraltısuyu kullanımına paralel olarak artması; günümüzdeki durumu koruyacak, soğuk su akiferindeki yeraltısuyu kullanımının günümüzdeki şekliyle sabit kalması ve gelecekte termal yeraltısuyu kullanımının daha fazla olması ise bu sıcak su girişimini engelleyecektir. Bununla birlikte, soğuk su sistemine karışmış olduğu belirlenen kirleticiler soğuk su akiferi içerisinde advectif ve dispersif süreçler ile yayılacak, ova yüzeyinden itibaren 200 m'nin altında gözlenen yüksek konsantrasyon değerleri gelecekte tüm akiferi etkileyecektir.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma, Hacettepe Üniversitesi, Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM) ile Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü arasında yürütülen "Akarçay Havzası Hidrojeolojisi ve Yeraltısuyu Akım Modeli" projesine paralel olarak yürütülmüştür. Yazar; çalışmaya teknik donanım, veri, ulaşım, konaklama ve arazi çalışmaları için destek sağlayan UKAM, DSİ Genel Müdürlüğü, DSİ Isparta Bölge Müdürlüğü ve çalışanlarına, veri toplama, arazi ve laboratuvar çalışmalarındaki destekleri için Yrd. Doç. Dr. Levent Tezcan, Dr. Teoman Meriç, Dr. Berrin Akan, Araş. Gör. Nilgün Doğdu ve Yrd. Doç. Dr. Türker Kurttaş'a, proje desteği ile çalışmanın sonuçlanmasına önemli katkı sağlayan Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi'ne ve Prof. Dr. Alparslan Arıkan'a teşekkür eder.

## KAYNAKLAR

- Argus Interware, Inc., 1997. User's Guide Argus ONE™, Argus Open Numerical Environments – A GIS Modeling System, Version 4.0. Jerico, NY, Argus Holdings, Limited, 506 pp.
- Atilla, A. Ö., 2002. Afyon Ovasının yeraltısuyu kütle taşınımı modeli. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 78 s (yayımlanmamış).
- Aydar, E., Bayhan, H. ve Zimitoğlu, O., 1996. Afyon stratovolkanının volkanolojik ve petrolojik gelişiminin incelenmesi. Yerbilimleri, 18, 87-107.
- Bear, J., and Verruijt, A., 1987. Modelling Groundwater Flow and Pollution. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Netherlands, 414 pp.

- Buxton, H. T., and Smolensky, D. A., 1999. Simulation of the effects of development of the groundwater flow system of Long Island, New York. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 98-4069, 57 pp.
- Cherry, J. A., 1983. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: a case study. *Journal of Hydrology*, 63 (1-2), 1-29.
- Daly, C., 1982. Evaluation of procedures for determining selected aquifer parameters. Prepared for U.S. Army Toxic Hazardous Materials Agency, CR REL Report 82-41.
- Doğdu, M. Ő., 2001. Akarçay (Afyon) Havzasında jeotermal kökenli yüzeysuyu ve yeraltısuyu kirliliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 143 s (yayımlanmamış).
- Durak, S. ve Küçük, O., 2000. Afyon Ömer-Gecek sahası test raporu, MTA Genel Müdürlüğü Raporu, 36 s (yayımlanmamış).
- Erkan, Y., Bayhan, H., Tolluođlu, Ü. ve Aydar, E., 1996. Afyon yöresi metamorfik ve volkanik kayaların jeolojik, petrografik ve jeokimyasal incelemesi. TÜBİTAK. YBAG/0044-DPT Projesi Raporu, 210 s (yayımlanmamış).
- Garabedian, S.P., 1987. Large-scale dispersive transport in aquifers: Field experiments and reactive transport theory. Ph.D. Thesis, MIT, Cambridge, MA, 290 pp (yayımlanmamış).
- Gelhar, L. W., Welty, C., and Rehfeldt, K. W., 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resources Research*, 28 (7), 1955-1974 pp.
- Goode, D.J., 1999. Age, double porosity, and simple reaction modifications for the MOC3D groundwater transport model. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4041, 34 pp.
- Hill, M.C., 1998. Methods and guidelines for effective model calibration. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 98-4005, 90 pp.
- Harbaugh, A.W., Banta, E.R., Hill, M.C., and McDonald, M.G., 2000. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model. User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121 pp.
- Kernodle, J. M., McAda, D. P., and Thorn, C. R., 1995. Simulation of groundwater flow in the Albuquerque Basin, central New Mexico, 1901-1994, with projections to 2020. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 94-4251, 114 pp.
- Konikow, L. F., 1977. Modeling chloride movement in the alluvial aquifer at the Rocky Mountain Arsenal, Colorado. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2044, 43 pp.
- Konikow, L. F., and Thompson, D. W., 1984. Groundwater contamination and aquifer restoration at the Rocky Mountain Arsenal, Colorado. In *Groundwater Contamination*, Washington D. C., National Academy Press, 93-103.
- Konikow, L.F., Goode, D.J., and Hornberger, G.Z., 1996. A three-dimensional method-of-characteristics solute-transport model (MOC3D). U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 96-4267, 87 pp.
- Levy, J., 1993. A field and modeling study of atrazine transport and fate in ground water. Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, 561 pp (yayımlanmamış).
- MacFarlene, D. S., Cherry, J. A., Gillham, R. W., and Sudicky, E. A., 1983. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: a case study, 1: groundwater flow and plume delineation. *Journal of Hydrology*, 63, 1-29.
- Metin, S., Genç, Ő. ve Bulut, V., 1987. Afyon ve dolayının jeolojisi. MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No: 8103 (yayımlanmamış).
- Metin, S., Genç, Ő., Bulut, V., Ölmez, M., Kılıç, İ., Akıncı, A., Umut, M. ve Kurt, Z., 1988. Bolvadin (Afyon) – Yunak (Konya) dolayının jeolojisi. MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No: 8522 (yayımlanmamış).
- Molson, J. W. H., 1988. Three-dimensional numerical simulation of groundwater flow and contaminant transport at the Borden Landfill. M.S. Thesis, University of Waterloo, 169 pp (yayımlanmamış).
- Molz, F. J., Güven, O., Melville, J. G., Crocker, R. D., and Matteson, K. T., 1986. Performance, analysis, and simulation of a two-well tracer test at the Mobile site, An examination of scale-dependent dispersion coefficients. *Water Resources Research*, 22 (7), 1031-1037.
- Öktü, G., Kara, İ. ve Önder, İ., 1997. Afyon ilinde yer alan Ömer-Gecek-Uyuz Hamamı-Alaplı-Kızık Hamamı ve Gazlıgöl jeotermal enerji sahalarının detay etüdü. MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No: 10027 (yayımlanmamış).
- Sanford, W.E., and Konikow, L.F., 1985. A two-constituent solute transport model for ground water having variable density. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 85-4279, 89 pp.
- Sudicky, E. A., Cherry, J. A. and Frind, E. O., 1983. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study, 4, A natural gradient dispersion test. *Journal of Hydrology*, 63 (1-2), 81-108.
- Şimşek, Ő., 2000. Research on isotope techniques for exploitation of geothermal reservoirs in Western Turkey. Final report, IAEA Research Contract No 9828/RO-R1, 25 pp (yayımlanmamış).



- Tezcan, L., Meriç, B.T., Doğdu, N., Akan, B., Atilla, A. Ö. ve Kurttaş, T., 2002. Akarçay Havzası hidrojeolojisi ve yeraltısuyu akım modeli. Final Raporu. Hacettepe Üniversitesi - Uluslararası Karst Su Kaynakları Uygulama ve Araştırma Merkezi (UKAM)-Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü, Ankara, 339 s (yayımlanmamış).
- TSE (Türk Standardları Enstitüsü), 1997. TS266 sular-ıçme ve kullanma suları standardı. Birinci Baskı, G.T.İ.P. 2201.90.00.00.11, ICS 13.060.20, Türk Standardları Enstitüsü-Ankara, 25 s.
- Voss, C.I., 1984. A finite-element simulation model for saturated-unsaturated, fluid-density-dependent ground-water flow with energy transport or chemically-reactive single-species solute transport. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 84-4369, 409 pp.